

文章编号 1004-924X(2013)10-2502-06

液滴半径与其侧向散射光通量关系的实验

李治龙, 吴志军*, 王 幸, 黄魏迪, 龚慧峰

(同济大学汽车学院, 上海 200092)

摘要:为开发基于侧向散射光通量的喷雾液滴直径全场测量方法,搭建了均匀液滴射流发生器和侧向散射光通量测试装置。基于微粒几何散射理论,利用均匀液滴射流发生器实验研究了液滴半径与其侧向散射光通量之间的关系。在不同的侧向散射角下,用数码相机测量了水和 0# 柴油的单粒径液滴射流在不同粒径下的侧向散射光通量,并分析了它们之间的关系。实验结果表明:液滴半径与其侧向散射光通量之间存在明显的二次函数关系,拟合的相关系数大于 0.98;侧向散射角的大小以及液体的种类均不会改变两者之间的二次函数关系,仅影响该关系式系数的大小。结果为基于侧向散射光通量实现喷雾液滴直径的全场测量提供了重要依据。

关键词:粒径测量;喷雾;液滴半径;侧向散射;光通量;单液滴射流

中图分类号: TB96 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2502

Experiments on relationship between droplet radius and its lateral scattering luminous flux

LI Zhi-long, WU Zhi-jun*, WANG Xing, HUANG Wei-di, GONG Hui-feng

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

* Corresponding author, E-mail: zjwu@tongj.edu.cn

Abstract: To develop a method based on the lateral scattering luminous flux to measure spray droplet diameter distribution, a uniform diameter single droplet stream generator and a measuring equipment for lateral scattering luminous flux were constructed. On the basis of the scattering theory, the relationship between the droplet radius and its lateral scattering luminous flux was researched by using the uniform diameter single droplet stream generator. The lateral scattering luminous fluxes of two different liquids, water and 0# diesel, were measured under different droplet diameters by a digital camera from different lateral scattering angles, and the relationship between them was analyzed. The experimental results show that a quadratic function relationship exists between the droplet radius and its lateral scattering luminous flux, and the correlation coefficient is greater than 0.98. Furthermore, the lateral scattering angle and the type of the liquid do not change this quadratic function relationship, but they will affect the coefficient of the quadratic function. It provides an important basis for the measurement of spray droplet diameter distribution.

收稿日期: 2013-03-28; **修订日期:** 2013-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51006075, No. 51076118, No. 51106113); 新世纪优秀人才支持计划资助项目 (No. NCET-10-0605); 上海市青年科技启明星计划资助项目 (跟踪) (No. 07QA14055); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2013M531209)

Key words: particle size measurement; spray; droplet radius; lateral scattering; luminous flux; single droplet stream

1 引言

柴油机中燃油的燃烧性能和有害排放物的生成在很大程度上是由燃油的喷射雾化质量所决定的,因此燃油喷雾特性的研究是柴油机研制中的一个重要方向^[1]。由于柴油喷雾属于三维瞬态密集型喷雾,喷雾过程受到多种因素的影响,其雾化机理的研究并不成熟^[2],不利于该过程的研究和理解。因此有必要深入分析喷雾的微观特性,其中包括喷雾雾滴直径的瞬时全场分布特性分析。目前已有较多方法可以实现喷雾雾滴粒径的测量,例如激光诱导荧光法(Laser Induced Fluorescence, LIF)^[3]、相位多普勒法(Phase Doppler Particle Anemometry, PDPA)^[4]、全息照相法^[5]、全局粒径/速度测量法(Global Size and Velocity measurement, GSV)^[6]、图像法^[7]、激光诱导荧光-麦氏散射法(Laser Sheet Droplet Sizing, LSD)^[8]等。但以上方法均有局限性,LIF方法中标准粒子的标定过程难以实现;PDPA技术只能测量喷雾场中“一点”的粒径和速度信息;全息图像的再现过程和算法较为复杂;GSV方法可测量的喷雾雾滴浓度范围比较窄;图像法精度较低;LSD方法对设备和标定工作的要求非常高。所以这些方法尚不能完全满足喷雾微观特征测量的需求。

综上所述,研究一种新的微观特性测试手段是喷雾测量体系的有益补充。本文提出了一种基于侧向散射光通量的液滴直径全场测量方法,在微粒几何散射理论的基础上,对液滴直径与其侧向散射光通量之间的关系进行了推导;搭建了均匀液滴射流发生器和侧向散射光通量测试装置;研究了不同侧向散射角下液滴半径与其散射光通量的关系,为利用该关系进行喷雾全场液滴直径分布的测量奠定了基础。

2 理论基础

根据微粒散射光理论的几何光学近似,散射可被视为衍射、折射和反射 3 部分光能的简单叠加^[9],在前向散射的应用中主要考虑其衍射效应,

而在侧向散射中一般考虑入射光在微粒中的折射和反射。如图 1 所示,假定微粒为圆形粒子,其半径为 r ,折射率为 m ,环境折射率为 1。入射光线与微粒表面的夹角为 τ ,进入粒子内部的折射光

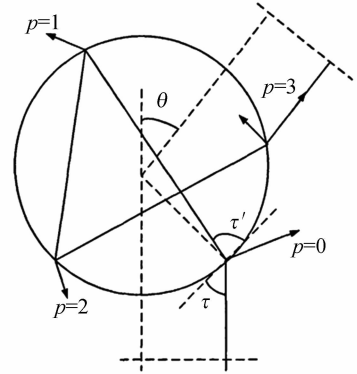


图 1 光线撞击大粒径粒子的反射和折射示意图
Fig. 1 Sketch map of light reflection and refraction through large droplet

线与粒子表面之间的夹角为 τ' ,入射光线距离球粒子对称轴的距离为 $r \times \cos \tau$,入射光线的强度为 I_0 。垂直于纸面的方位角为 φ ,利用 $d\varphi$ 和 $d\tau$ 可以确定入射光线,通过简化计算出射光线的强度,可以获得进入某一微小立体角 $\sin \theta \times d\theta \times d\varphi$ 中的距离微粒 l 处的光强表达式^[10],为:

$$I_1(p, \tau) = \frac{\epsilon_1^2 I_0 r^2 \cos \tau \cdot \sin \tau \cdot d\tau \cdot d\varphi}{l^2 \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi} = \frac{r^2}{l^2} I_0 \epsilon_1^2 D \quad (1)$$

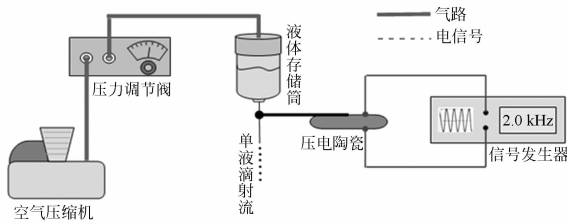
式中: I_1 代表一个偏振方向下的散射光强,与其垂直的另一个偏振方向下的散射光强具有相同的形式; p 代表第 p 条出射光线; ϵ_1 是光强在反射和折射时的分配系数; D 为散度,与散射角和入射角有关。从式(1)可以看出,从微粒中散射出的光强与微粒半径的平方成正比。在光度学中,光通量在数值上是所观察的立体角内光强的积分,由此可知积分所获得的侧向散射光通量与微粒半径也应存在二次函数关系。目前,这一结论已有了初步的应用^[8,11],但由于该结论是通过散射理论的近似简化获得的,这一关系在喷雾液滴直径测量中的适用性以及适用条件还需要进一步的实验验证。

3 台架搭建及数据处理

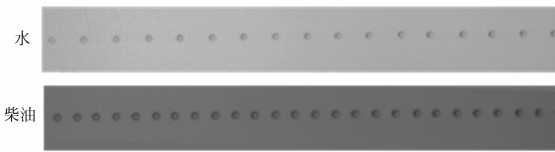
为定量研究液滴半径与其侧向散射光通量的关系,本文搭建了均匀液滴射流发生装置以获得粒径大小已知的液滴流,并利用数字相机实现了侧向散射光通量的采集。在综合考虑实验验证条件以及实际燃油喷雾测量需求的基础上,本文选取了水和 0# 柴油两种液体进行验证。侧向散射光通量的采集中心角选择了 60,90 和 130° 3 个角度,每种液体均利用均匀液滴射流发生装置产生出 5 种不同粒径的液滴流进行侧向散射光通量的测量。

3.1 均匀液滴射流发生装置搭建

均匀液滴射流发生装置如图 2(a)所示。该装置以 Rayleigh 破碎理论为基础^[12],液体在高压空气的作用下经过毛细针管形成射流,通过在稳定射流上施加由信号发生器和压电晶体产生的频率合适的扰动,该发生装置将生成大小均匀、间距相等的水及柴油的均匀液滴射流,如图 2(b)所示。通过更换不同内径的毛细针管、调整高压空气的压力或者扰动频率,该装置能够方便地改变均匀液滴的直径,从而获得实验所需的不同粒径的均匀液滴流。



(a)发生装置
(a)Generator



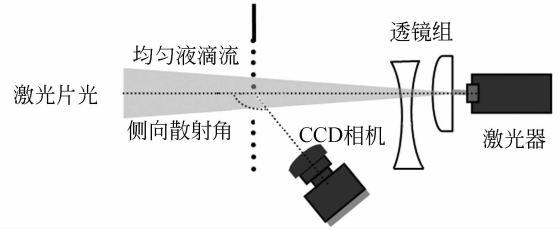
(b)射流图像
(b)Images of single droplet stream

图 2 均匀液滴射流的发生装置及射流图像

Fig. 2 Sketch of uniform diameter single droplet stream generator

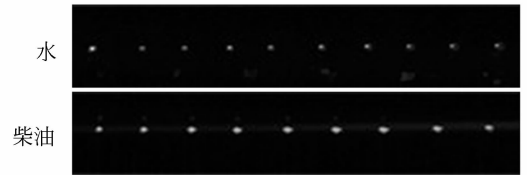
3.2 均匀液滴射流侧向散射光通量测试台架

为实现不同侧向散射光通量的测量,本文搭建了相应的测试台架。利用激光片光对均匀液滴射流进行照明,并利用数字相机测量不同侧向散射光通量采集中心角下的光通量,如图 3(a)所示。图 3(b)是散射角为 90°时,利用该系统拍摄所获得的水和柴油的均匀液滴射流在平面激光照射下的侧向散射图像。根据数字相机与均匀液滴射流之间的距离以及相机光圈的大小,可以计算出采集侧向散射光通量的立体角的张角为 3.2°。在整个验证实验过程中,采集立体角的大小保持不变。



(a)测量装置

(a)Measurement setups



(b)侧向散射图像

(b)Scattering images of single droplet stream

图 3 均匀液滴射流的散射光通量测量

Fig. 3 Sketch of scattering flux measurement

3.3 实验数据处理

根据数字相机 CCD 芯片的曝光特性,即在理想状况下其传感器的光敏单元在达到饱和以前,产生的信号电荷 U 与曝光量 E 成线性关系,可知拍摄的雾滴颗粒像的灰度值总和 G 与所对应的光敏单元产生的信号电荷成线性关系^[13],即:

$$G = k_1 U = k_1 (k_2 \cdot \Phi \cdot t \cdot \gamma_1 + V_D), \quad (2)$$

式中: k_1 为光敏单元信号电荷转变成数字图像灰度的系数, k_2 为非饱和区直线段斜率, γ_1 为光电转换系数, t 为曝光时间, Φ 为光通量, V_D 为无光照时 CCD 的输出电压。因此,在没有曝光过度的情况下,通过数字相机拍摄到均匀液滴的散射图像之后,利用数字图像处理的方法可获得每个液

滴像的灰度值总和,且该值将正比于拍摄立体角内的侧向散射光通量。同时,由于本文只关心液滴的侧向散射光通量与其半径之间的关系,而不关心其光通量绝对值的大小;因此测量过程中,为了避免液滴图像曝光过度,不同散射角度下选择了不同的入射激光强度,但这并不会影响利用液滴像的灰度值总和来研究液滴半径与其侧向散射光通量之间的关系。

由于拍摄到的均匀液滴射流各液滴间的间隔较大(图 3b),为了更好地处理和分析数据,本文利用 Matlab 软件编写处理软件,实现了各个液滴的灰度值总和的自动处理和计算。

均匀液滴射流中每一个液滴的体积等于以射流毛细管内径为直径、以各液滴之间长度为高度的圆柱体的体积。通过标定出图像中单个像素所对应的真实尺寸(如图 4 所示);然后,利用该尺寸在均匀液滴射流图像中计算出各个液滴之间的实际长度;最后,根据毛细管的内径计算出均匀液滴的半径。

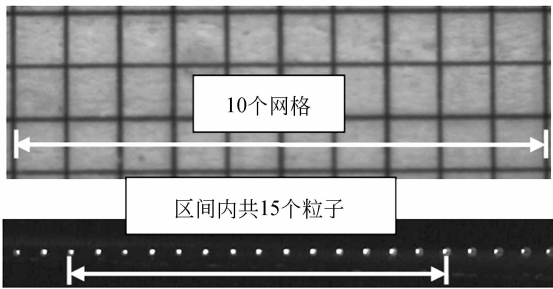


图 4 图像标定和单液滴射流中液滴间距获取示意图
Fig. 4 Pixel calibration and measurement of space between droplets

4 实验结果分析

本文通过均匀液滴流实验,分别对水和 0 # 柴油两种不同液体在 3 个不同侧向散射角下的散射光通量与其半径之间的关系进行了研究。图 5 是水在各角度下的实验结果,从图中可以看出,所获得的灰度值总和与液滴半径之间呈十分明显的二次函数关系,不同散射角度下的二次函数的形态也是比较接近的。拟合出的二次函数趋势线的相关系数可以达到 0.995。

图 6 是柴油均匀液滴射流侧向散射光通量的测量结果。由于水和柴油具有不同的物化特性,

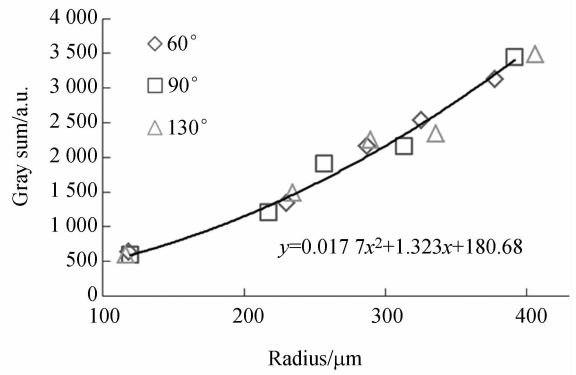


图 5 水的液滴散射像灰度值总和与其半径的关系
Fig. 5 Relationship between radius and its lateral scattering luminous flux of water droplet

主要体现在折射率的不同会对其散射光强的分布造成很大的影响。从测量的结果来看,与水相比,柴油液滴的侧向散射光通量在不同的散射角度下的差异较大,但是柴油液滴像灰度值总和与其半径之间的二次函数关系仍然是十分明显的。不同散射角度下获得的结果均可以拟合出二次函数趋势线,最低的相关系数也可达到 0.981。

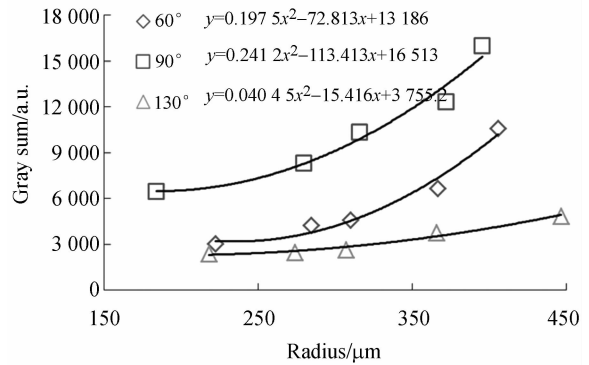


图 6 0# 柴油的液滴散射像灰度值总和与其半径的关系
Fig. 6 Relationship between radius and its lateral scattering luminous flux of 0# diesel droplet

由上述实验结果可知,液滴半径与其像的灰度值总和之间拟合出的二次函数关系式是带有一次项和常数项的,而理论推导结果仅含有二次项,两者存在较大的差异。由于液滴直径为 0 时不可能产生散射光,因此该二次函数在理论上是不应该出现常数项的;然而由于实际测量时采用的 CCD 数字相机在没有光照的情况下存在一定的暗电流,从而导致二次函数中出现常数项。另一方面,由于实验验证时所采用的粒径实验点都分

布在粒径较大的区域内,拟合时更多地考虑了该粒径段的趋势,而并没有把粒径为 0 的特殊点考虑进去,这也会造成实验验证的结果与理论推导结果存在差异。

虽然理论推导和验证结果存在一定的差异,但实验研究仍然证明了理论简化推导所发现的液滴半径与其侧向散射光通量之间存在二次函数关系的结论。不同的侧向散射角度、不同的液体类型都不会改变这种函数关系,只是会影响二次函数的各项系数。

5 结 论

为研究基于侧向散射光通量的液滴粒径全场测量方法,本文对液滴半径与其侧向散射光通量

之间的关系进行了理论研究和实验验证。在理论推导出液滴半径与其散射光通量存在二次函数关系的基础上,搭建了均匀液滴射流发生装置,在不同侧向散射角度、不同液体类型下研究了液滴的半径与其散射图像灰度值总和的关系。

实验结果验证了理论简化推导的液滴半径与其侧向散射光通量之间存在二次函数的结论,实验数据拟合的二次函数的相关系数大于 0.98。由于实验系统本身的特性导致实验获得的二次函数在形式上与理论推导的结果存在一定的差异,出现了一次项和常数项,因此在应用该关系进行液滴直径测量时,需要进一步地研究和分析造成这些差异的因素,从而进一步修正该条件下的关系式。本研究为研究基于液滴侧向散射光通量的喷雾液滴直径全场测量方法奠定了基础。

参考文献:

- [1] GAO Y, DENG J, LI CH Y, *et al.*. Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(5): 616-624.
- [2] 胡宗杰,肖春江,李治龙,等. 基于超声雾化的碳氢燃料多液滴流制备系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(4):871-876.
HU Z J, XIAO CH J, LI ZH L, *et al.*. Multi-droplet stream creating system of hydrocarbon fuel based on ultrasonic atomization technology [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2012, 42(4):871-876. (in Chinese)
- [3] LEE J K, NISHIDA K. Development of an LIF image processing technique for measuring drop sizes in a pre-swirl spray [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2008, 9(4):381-390.
- [4] 林晓钢,顾乃庭,杨泽平. 小孔夫琅和费衍射法标定 CCD 光电响应特性[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 410-414.
LIN X G, GU N T, YANG Z P. Calibration of CCD photoelectric characteristics by pin hole Fraunhofer diffraction method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 410-414. (in Chinese)
- [5] 吕且妮,张以谟,葛宝臻. 数字全息技术及其在粒子场测试中的研究进展[J]. 光电子·激光, 2002, 13(10): 1087-1091.
LÜ Q N, ZHANG Y M, GE B ZH. Progress of studies on digital holography and its application in particle field [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(10):1087-1091. (in Chinese)
- [6] PAN G, SHAKAL J, LAI W, *et al.*. Simultaneous global size and velocity measurements of droplets and sprays [C]. *Proc ILASS, Orleans, France*, 2005: 91-96.
- [7] WU Z J, HUANG Z, HAO L J. An image shifting technique based on gray-scale classification for particle image velocimetry [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2002, 38:235-243.
- [8] CHEN H, XU M, ZENG W, *et al.*. An improved monosize droplet generator for SMD calibration [C]. *The 13th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, Wuxi, P. R. China*, 2009:97-103.
- [9] 徐峰,蔡小舒,沈嘉祺. 米氏理论的近似值在粒度测量中的应用 [J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1464-1469.
XU F, CAI X SH, SHEN J Q. Geometric approximation of light scattering in arbitrary diffraction regime for absorbing particles: application in laser particle sizing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1464-1469. (in Chinese)
- [10] Van de HUST H C. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Dover Publications Inc., 1981:200-206.
- [11] 李学彬,高亦桥,魏合理,等. 双散射角光学粒子计数器的研制[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1528-1534.

- LI X B, GAO Y Q, WEI H L, *et al.*. Development of optical particle counter with double scattering angles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17 (7):1528-1534. (in Chinese)
- [12] SCHNEIDER J M, HENDRICH S C D. Source of uniform-sized liquid droplets [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1964, 35: 1349-1350.
- [13] 田志松, 吴志军. 基于声光调制的粒子图像速度粒度场成像系统开发[J]. *应用激光*, 2005, 25(6): 389-394.
- TIAN Z S, WU ZH J. Development of an imaging system of the particle image velocimetry and sizer (PIVS) based on acousto-optic modulation [J]. *Applied Laser*, 2005, 25(6): 389-394. (in Chinese)

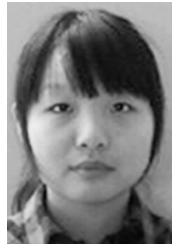
作者简介:



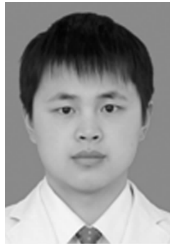
李治龙(1982—),男,四川遂宁人,博士后,2005年,2008年于上海交通大学分别获得学士、硕士学位,2012年于同济大学获得博士学位,主要从事燃油喷雾微观特性及喷嘴内部结构诊断方法的研究。E-mail: lizhilong@tongji.edu.cn



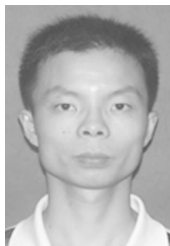
吴志军(1972—),男,江西人,教授,1993年于南昌大学获得学士学位,1995年,1999年于吉林工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事内燃机喷雾和燃烧及其诊断方法的基础研究。E-mail: zjwu@tongji.edu.cn



王 幸(1989—),女,河南许昌人,硕士研究生,2011年于华北水利水电大学获得学士学位,主要从事发动机喷雾测量方面的研究。E-mail: 825453193@qq.com



黄魏迪(1984—),男,广西柳州人,博士研究生,2008年于同济大学获得学士学位,主要从事高压燃油的喷嘴内流动特性模拟与试验,喷雾液核破碎机理等研究。E-mail: 08_huangweidi@tongji.edu.cn



龚慧峰(1986—),男,湖南益阳人,博士研究生,2009年于天津大学获得学士学位,主要从事内燃机燃油喷雾的研究。E-mail: gonghui Feng@126.com.

(版权所有 未经许可 不得转载)